



Les domaines de physique accessibles grâce à ALTO

F. Ibrahim

► To cite this version:

F. Ibrahim. Les domaines de physique accessibles grâce à ALTO. IPN Science, 2004, 8, pp.11-15.
in2p3-00024889

HAL Id: in2p3-00024889

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00024889>

Submitted on 18 Oct 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les domaines de physique accessibles grâce à ALTO

Le projet ALTO (Accélérateur Linéaire auprès du Tandem d'Orsay) consiste en l'installation d'un accélérateur d'électrons (10-50 MeV, 10μA) dans les aires expérimentales du Tandem de l'IPN Orsay. Cette installation, qui sera opérationnelle dès 2005, s'intègre parfaitement au Tandem ce qui ouvre de larges perspectives pour les études de structure nucléaire, pour des programmes pluridisciplinaires (chimie, biologie, physique atomique et de la matière condensée) ainsi que pour des activités de recherche et de développement sur les accélérateurs.

L'étude des noyaux loin de la stabilité est constitutive de l'histoire de la physique nucléaire dès son origine, et connaît un essor considérable. Parmi les nucléides les plus éphémères, ceux situés aux frontières de notre connaissance sont qualifiés d'« exotiques ». Etudier ces noyaux, c'est se donner la chance d'accéder à des informations nouvelles sur la structure nucléaire et ainsi mesurer la solidité de notre conception de la matière nucléaire et sa validité lorsque cette dernière est poussée dans des états « extrêmes ».

Cette quête ne date pas d'hier. Les premiers noyaux exotiques (en leur temps) ont été découverts en 1934. Ce sont les premiers radioéléments artificiels produits par Irène et Frédéric Joliot-Curie, fondateurs de l'Institut de Physique Nucléaire, noyaux de ^{13}N , ^{30}P et ^{27}Si obtenus en bombardant des cibles de bore, d'aluminium et de magnésium avec les α de la radioactivité spontanée du radium.

Ainsi pour la première fois dans l'histoire, des êtres humains créaient de nouveaux noyaux de vies trop courtes pour avoir subsisté sur terre depuis leur formation dans les chaudrons cosmiques que sont les étoiles.

Comment *produit*-t-on des noyaux radioactifs ? *Produire* c'est d'une part mettre en jeu la réaction nucléaire susceptible de **créer** les noyaux d'intérêt, mais également **rendre disponibles** ces noyaux fraîchement créés pour l'expérience. Pour qu'une réaction nucléaire ait lieu il est nécessaire que deux noyaux entrent en contact, plus ou moins violemment ; en général un noyau projectile est envoyé sur un noyau cible. Historiquement, comme dans l'expérience des Joliot l'énergie fournie aux projectiles était d'origine « naturelle » : les particules alpha de la radioactivité naturelle, puis les neutrons produits eux même par transmutation ; mais très vite, afin de diversifier les projectiles et les énergies disponibles (et donc les réactions nucléaires possibles) l'homme a fourni lui-même cette énergie en construisant des accélérateurs.

Les avancées dans la *production* de noyaux exotiques se sont ainsi faites au rythme du développement des technologies d'accélérateurs et de l'augmentation des connaissances des mécanismes de réaction.

Les difficultés inhérentes aux techniques de production des noyaux exotiques ont laissé en particulier une grande part des noyaux riches en neutrons dans l'inconnu. Afin d'accéder à ces réserves de découvertes intactes, il est nécessaire de produire ces noyaux exotiques non seulement en plus grande quantité possible mais aussi sous forme de faisceaux accélérés. Les problèmes que soulève la mise en œuvre de tels faisceaux d'ions radioactifs suscite à l'heure actuelle un énorme effort de recherche et développement au sein de notre discipline.

Depuis plusieurs années, l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay s'est montré à la pointe en ce domaine grâce au programme PARRNe.

La réaction nucléaire choisie pour produire les noyaux exotiques dans le cadre de PARRNe est la fission de l' $\text{U}238$. Les noyaux produits par la fission sont dits « de masse intermédiaire » et sont très excédentaires en neutrons. La technique de « mise à disposition » de ces noyaux retenue est celle dite « en cible épaisse » ou méthode ISOL. Le programme a donc pour objectif la détermination des conditions optimales de production des noyaux riches en neutrons issus de la fission de l' $\text{U}238$ par la technique ISOL.

Toutes les expériences du programme PARRNe obéissent au même principe : l'uranium se situe dans une cible (épaisse), cette cible est bombardée par des projectiles susceptibles de provoquer la fission de ^{238}U , c'est à dire, en l'état d'avancement du programme, des neutrons rapides. Les neutrons rapides sont obtenus en arrêtant le faisceau de deutons du tandem accéléré à une énergie de 26 MeV dans un convertisseur. Les deutons se cassent à l'intérieur de ce convertisseur, libérant les neutrons rapides essentiellement vers l'avant avec une énergie à peu près égale à la moitié de l'énergie incidente. Lors de la réaction, les produits de la fission apparaissent sous forme atomique dans la cible, la difficulté est ensuite de les en faire sortir pour éventuellement les ioniser et ainsi pouvoir les accélérer. La facilité avec laquelle les éléments produits lors de la fission sortent de la cible dépend de leurs propriétés physico-chimiques.

L'optimisation des conditions de production passe donc par l'optimisation des conditions de la fission (l'énergie et la nature du faisceau incident, le type et la géométrie du convertisseur, la structure de la cible) et par l'optimisation des conditions d'extraction et d'ionisation des produits de fission (optimisation de l'ensemble cible-source d'ions). Pour mettre en œuvre ce programme une ligne de type ISOL, dotée d'un séparateur en masse, a été installée au TANDEM. Ce montage permet de s'approcher au mieux des conditions expérimentales qui seront rencontrées sur la future installation SPIRAL 2 au GANIL. Les résultats obtenus avec les faisceaux du tandem ont été tels qu'il a été possible d'initier un programme de physique original auprès de cet outil initialement destiné à des études de R&D.

Très rapidement, l'ensemble de ces succès a mis en évidence la nécessité d'augmenter de manière significative les productions de noyaux exotiques auprès de PARRNe. L'idée de remplacer les neutrons produits par le tandem et induisant la fission par des gammas (on parle alors de photofission) est apparue comme évidente. Les photons γ sont obtenus par le rayonnement de freinage (bremsstrahlung) d'électrons à l'intérieur d'un convertisseur. Afin de tester la pertinence du remplacement du projectile neutron par des photons, nous avons effectué une expérience auprès du LIL, l'injecteur du LEP au CERN. Le faisceau d'électron de 50 MeV fourni par cet injecteur nous a permis de tester la production des gaz rares par photofission dans les mêmes conditions que lors d'expériences précédentes avec des neutrons. Les résultats obtenus montrent de manière non ambiguë que l'option électrons est comparable au niveau de la production avec l'option deutons. Le coût, plus faible, d'un accélérateur d'électrons et la facilité avec laquelle il est possible d'obtenir des faisceaux intenses rend donc cette option très séduisante. Le LEP est désormais en cours de démantèlement et un hasard de l'histoire aura dédié la dernière impulsion d'électrons de la vie de cet injecteur dans le vaste complexe accélérateurs du CERN, à une expérience de physique nucléaire. L'installation de cet injecteur dans les aires expérimentales du tandem permettrait d'obtenir un gain d'un facteur 100 dans les productions de noyaux exotiques. Les instances scientifiques du CERN, sollicitées par de nombreux laboratoires internationaux, impressionnées par les résultats de notre expérience, ont décidé de céder cet accélérateur à l'IPN suite à l'arrêt du LEP. Le projet ALTO naissait.

L'Institut de Physique Nucléaire profite ainsi de la possibilité de compléter les installations du tandem et du dispositif PARRNe par un accélérateur d'électrons de 50 MeV d'énergie et de 10 μA de courant moyen. L'intensité (nombre de fissions par seconde) est du même ordre de grandeur que sur les autres machines existantes: ISOLDE, OSIRIS, HRIBF. La combinaison d'une production par pure fission à basse énergie, sans contaminations par des isobares déficitaires en neutrons, et la possibilité d'utiliser des sources d'ions chimiquement sélectives assure pour ALTO une niche importante pour les faisceaux uniques en pureté d'une trentaine de « nouveaux » isotopes très riches en neutrons.

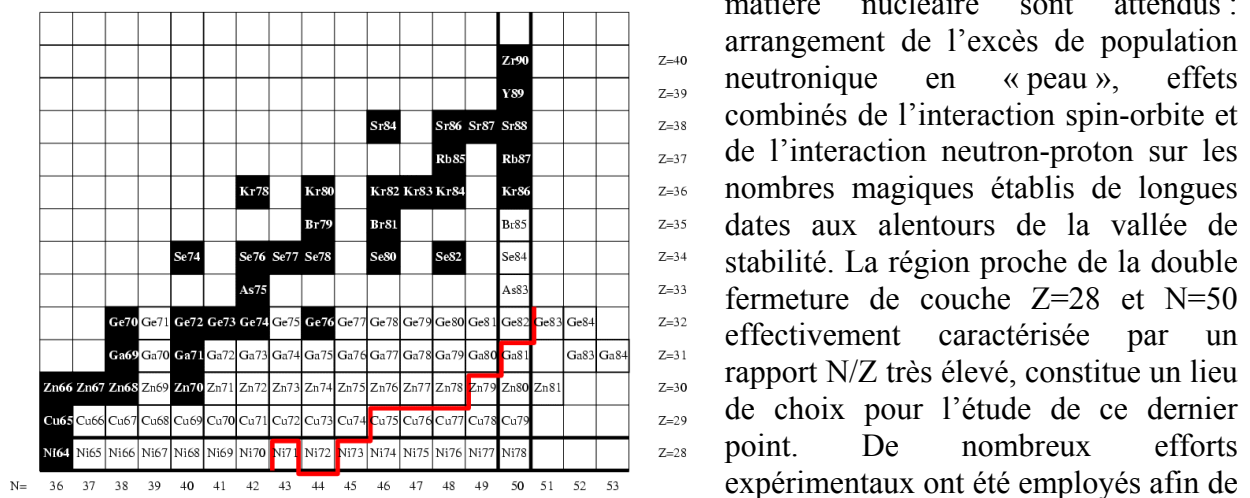
Les axes majeurs de la physique étudiés auprès d'ALTO sont l'étude de la magicité des noyaux riches en neutrons, l'étude du processus r en astrophysique nucléaire, la mesure de propriétés fondamentales de noyaux très exotiques tels que la forme ou la masse.

ALTO a également pour vocation d'être un banc d'essai pour les futures installations de faisceaux exotiques SPIRAL2 et EURISOL. En effet, puisque l'un des points les plus sensibles de ces deux projets concerne l'optimisation des ensembles cibles sources dont dépend directement la production des noyaux exotiques les travaux menés sur ce sujet auprès d'ALTO permettront de produire les faisceaux SPIRAL2 dans des conditions optimales.

Par ailleurs, avec ALTO, nous réalisons un appareillage qui vient conforter la politique d'ouverture pluridisciplinaire du Tandem d'Orsay, que ce soit en terme d'applications à la chimie, la biologie, la physique atomique et de la matière condensée, qu'en terme d'applications industrielles, tels la validation de composants pour le spatial.

Etude de la magicité des noyaux riches en neutrons

L'étude de l'évolution des effets de couches très loin de la vallée de stabilité constitue à l'heure actuelle un axe majeur de la recherche en physique nucléaire tant sur le plan expérimental que sur le plan théorique. En particulier dans les noyaux contenant un nombre de neutrons en fort excès par rapport au nombre de protons, de nouveaux comportements de la



matière nucléaire sont attendus : arrangement de l'excès de population neutronique en « peau », effets combinés de l'interaction spin-orbite et de l'interaction neutron-proton sur les nombres magiques établis de longues dates aux alentours de la vallée de stabilité. La région proche de la double fermeture de couche $Z=28$ et $N=50$ effectivement caractérisée par un rapport N/Z très élevé, constitue un lieu de choix pour l'étude de ce dernier point. De nombreux efforts expérimentaux ont été employés afin de déceler les premiers signes d'affaiblissement des effets de couches le long de $Z=28$ et $N=50$. Quant au noyau ^{78}Ni situé au croisement de ces deux nombres, il est resté jusqu'à présent inaccessible aux études directes de structure et la question de sa double magicité reste ouverte. La diversité et l'intensité des faisceaux de produits de fissions très riches en neutrons qui seront disponible auprès d'ALTO permettront de faire un pas supplémentaire dans cet important champs d'étude. La ligne rouge représentée sur la figure deux indique la frontière de nos connaissances en structure dans la région du ^{78}Ni . Les productions déjà obtenues à PARRNe avec les faisceaux de deutons du Tandem nous ont déjà permis d'explorer les premiers états excités de ^{81}Ga et ^{83}Ge . Le gain en production attendu avec ALTO permettra d'aller beaucoup plus loin dans cette exploration et peut être même, de produire suffisamment ^{78}Ni pour commencer son étude.

Etude du processus r en astrophysique nucléaire



La moitié environ des éléments se situant au-delà du fer dans la charte des noyaux ont été produits par l'intermédiaire de capture de neutrons dans des environnements très riches en neutrons (processus r). L'existence de pics d'abondance naturelle de certains éléments, reliés directement aux fermetures de couches en neutrons, semble indiquer que ces captures de neutrons se sont produites loin de la vallée de stabilité. Ce processus se produit en quelques secondes lors de l'effondrement d'une étoile massive. La nature, afin de synthétiser éléments plus lourds, emprunte alors un chemin passant par des noyaux extrêmement exotiques dont la plupart n'ont

jamais pu être étudiés en laboratoire. Grâce au projet ALTO il sera possible d'identifier, d'isoler et d'étudier certains de ces noyaux et d'améliorer ainsi notre compréhension de ce cycle de formation qu'est le processus r. Les propriétés des noyaux les plus importantes à étudier pour l'astrophysique nucléaire sont des propriétés fondamentales telles que les masses, les durées de vie, les probabilités d'émission neutron ... En particulier, le développement sur les ensembles cibles sources de ALTO destinés à favoriser la sortie des éléments réfractaires est d'une grande importance pour la compréhension des processus astrophysiques.

Spectroscopie laser auprès d'ALTO

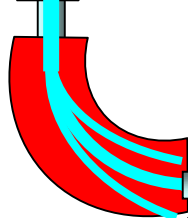
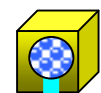
La forme du noyau atomique est une grandeur fondamentale car elle permet de tester et de valider les différents modèles nucléaires. A cet égard, certaines grandeurs sont importantes à déterminer : ce sont notamment le rayon de charge nucléaire et le moment quadrupolaire qui signent la forme du noyau, et le moment magnétique qui est fortement lié au degré de pureté des fonctions d'onde décrivant une configuration nucléaire donnée.

Loin de la stabilité, certains noyaux se comportent de façon curieuse : rajoutez-leur ou ôtez-

leur un seul neutron et leur forme peut en être modifiée de façon importante. Comment une seule particule peut-elle avoir autant d'influence ?

Les noyaux exotiques qui seront accessibles à ALTO permettront un large programme de recherche de

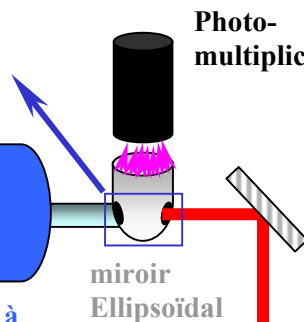
Source d'ions



Lentille
d'accélération
décélération

Faisceau séparé en masse

Cellule à
Echange de
charge



miroir
Ellipsoïdal

Laser de haute
résolution



spectroscopie laser. Ce programme se fera par ailleurs en parallèle avec le programme de R&D sur les sources laser permettant d'obtenir des faisceaux très purs auprès d'ALTO. Les principaux enjeux pour la spectroscopie laser à ALTO concernent là encore le comportement de la matière nucléaire située loin de la stabilité et en particulier lors du passage des couches magiques. Un système de spectroscopie laser colinéaire sera mis en place pour étudier en particulier l'évolution de la forme des noyaux de Ge au passage de la couche $N=50$.

ALTO constituera ainsi, pour les faisceaux de basses énergies de noyaux riches en neutrons, une plateforme expérimentale pour la communauté scientifique internationale.